



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 16 178 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
H 04 B 10/18
H 04 B 10/17
G 02 B 6/00
G 08 C 23/06

②1 Aktenzeichen: 198 16 178.6
②2 Anmeldetag: 14. 4. 98
④3 Offenlegungstag: 21. 10. 99

DE 198 16 178 A 1

⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Noé, Reinhold, Prof. Dr.-Ing., 33100 Paderborn, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

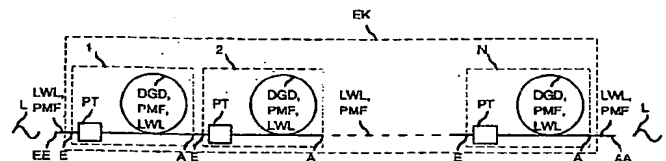
DE 35 28 294 C2
DE 197 55 361 A1
DE 196 41 577 A1
US 54 73 457
US 43 89 090
JP 60- 7 418 A

LAGORCEIX, H., REYNAUD, F.: Birefringent effect
measurement and compensation in a highly
birefringent fiber optical path modulator. In:
Optics Communications 118, 1995, S.235-240;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Emulator und Kompensator für Polarisationsmodendispersion

⑤7 Ein Emulator oder Kompensator (EK) von Polarisationsmodendispersion einer Lichtwelle (L) besitzt einen Eingang (EE), einen durchgehenden Lichtwellenleiter (LWL), der ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter (PMF) mit einer differentiellen Gruppenlaufzeit (DGD) ist, einen Polarisationstransformator (PT) und einen Ausgang (AA). Der Polarisationstransformator (PT) ist ebenfalls in polarisationserhaltendem Lichtwellenleiter (PMF) ausgeführt und erlaubt endlose Polarisationsrotationen. Der Emulator oder Kompensator (EK) kann aus mehreren Einzelemulatoren oder -kompensatoren (1, 2, ..., N) bestehen, welche jeweils einen Eingang (E) und einen Ausgang (A) besitzen.



DE 198 16 178 A 1

Die Erfindung betrifft einen Emulator und Kompensator für Polarisationsmodendispersion, mit dem die Polarisation einer elektromagnetischen, vorzugsweise optischen Welle frequenzabhängig verändert werden kann.

Die Erfindung ist deshalb gleichzeitig ein frequenzabhängiger Polarisationstransformator.

In der optischen Übertragungstechnik werden lange Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecken eingesetzt. Die Lichtwellenleiter selbst sind herstellungsbedingt nicht vollständig isotrop, sondern schwach doppelbrechend. Wegen der großen Übertragungslänge ergibt sich eine frequenzabhängige Polarisationsumwandlung der Übertragungsstrecke. Dies nennt man Polarisationsmodendispersion oder Polarisationsdispersion, abgekürzt PMD. Sie führt insbesondere zur Verbreiterung gesendeter Impulse, was die verwendbare Übertragungsdatenrate limitiert. Erschwert wird die Situation dadurch, daß sich durch Temperatur oder mechanische Beanspruchung das Übertragungsverhalten und somit auch die PMD der Strecke ändert. Deshalb werden adaptive PMD-Kompensatoren benötigt, die in den Übertragungspfad eingefügt werden. Zu deren Entwicklung oder einfach zum Prüfen der PMD-Toleranz nicht PMD-kompensierter Übertragungssysteme werden vielfach einstellbare, aber einfache, kostengünstige und dämpfungsarme PMD-Emulatoren gebraucht, welche das frequenzabhängige Polarisationsübertragungsverhalten von LWL-Strecken von bis zu mehreren 1000 km Länge zu unterschiedlichen Zeitpunkten und bei unterschiedlichen Temperaturen in statistisch signifikanter Weise nachbilden können.

Der PMD-Kompensator soll bei mindestens einer optischen Frequenz das Polarisationsübertragungsverhalten des Gesamtsystems von Übertragungsstrecke und Kompensator (oder umgekehrt, je nach Anordnung) in Näherung erster und ggf. auch höherer Ordnung näherungsweise frequenzunabhängig machen. Im Wellenlängenmultiplexbetrieb ist es anzustreben, diese Frequenzunabhängigkeit bei den Betriebswellenlängen zu erreichen. Die Erfindung läßt sich sowohl als PMD-Emulator, wie auch als PMD-Kompensator einsetzen.

Anforderungen an ein solche Baugruppe sind niedrige Einfügedämpfung, Kompatibilität zu Lichtwellenleitern und in vielfacher Hinsicht frequenzabhängig veränderbares Polarisationsübertragungsverhalten.

Zur Emulation oder Kompensation von PMD eignet sich klarerweise eine Baugruppe, welche dieselben bzw. die inversen Übertragungseigenschaften besitzt wie eine Übertragungsstrecke.

In der Literatur wird PMD oft mathematisch durch viele Retarder oder Polarisationsrotatoren beschrieben, die zwischen stärker doppelbrechenden, also zwischen den beiden Hauptpolarisationen merkliche Verzögerungszeiten aufweisenden LWL-Stücken angeordnet sind. Diese stark doppelbrechenden LWL-Stücke erhalten oder bewahren zwei zueinander orthogonale Hauptpolarisationen (principal states-of-polarization), kurz PSP, und sind daher polarisationserhaltende Lichtwellenleiter (polarization-maintaining fiber), kurz PMF. Diese PMF sind stark polarisationsdispersiv. Ein entsprechendes Beispiel ist im Tagungsband zur Optical Fiber Communications Conference 1995 (OFC '95) der Optical Society of America als Beitrag WQ2 auf S. 190-192 beschrieben.

In Electron. Lett., 17. Feb. 1994, Band 30, No. 4, S. 348-349 ist PMD-Kompensation beschrieben. Auch hier werden mehrere Stücke PMF verwendet, welche durch Polarisationstransformatoren verbunden sind. Diese Literaturstelle ist von Bedeutung, weil dort der Anschluß eines PMD-Kompensators an einen optischen Empfänger sowie die Gewinnung eines Regelkriteriums beschrieben werden, und dient deshalb dieser Erfindung als Oberbegriff.

Man erkennt, dass sich solche Anordnungen sowohl als PMD-Emulatoren, wie auch als PMD-Kompensatoren einsetzen lassen.

In der Praxis beschränken sich die genannten Literaturstellen auf sehr wenige Stücke PMF, und die auftretende Lichtdämpfung dürfte wegen notwendiger Spleißverbindungen recht hoch sein.

Funktionell ähnliche oder äquivalente Anordnungen, welche es erlauben, sehr viele solche Polarisationstransformatoren und PMF-Stücke so zu kaskadieren, daß sie eine sehr geringe Dämpfung aufweisen, sind aber nicht bekannt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, einen PMD-Emulator und PMD-Kompensator anzugeben, der gegenüber dem Stand der Technik eine sehr geringe Einfügedämpfung besitzt und auch leicht herstellbar ist.

Diese Aufgabe wird durch die Emulatoren und Kompensatoren von Polarisationsmodendispersion mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Weitere Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Erfindungsgemäß eignet sich ein längeres Stück polarisationserhaltender Lichtleitfaser (PMF) zur Herstellung eines PMD-Emulators oder PMD-Kompensators. Die Hauptpolarisationen sind dabei, wie bei handelsüblicher polarisationserhaltender Lichtleitfaser, in einem ersten Ausführungsbeispiel bevorzugt näherungsweise linear. Verteilt über der Länge befinden sich Torsionssektionen, in denen die PMF tordiert wird, so daß sich Polarisationsumwandlungen ergeben.

Die Torsion von PMF ist bereits aus Applied Optics, Band 18, No. 13, S. 2241-2251 als ein Mittel bekannt, durch das sich Polarisationsumwandlungen in linear doppelbrechendem LWL durchführen lassen, siehe dort Fig. 9. Allerdings ist die Doppelbrechung von handelsüblicher PMF so stark, daß eine Torsion um die dort angegebenen 68° die PMF zumindest langfristig zerstören würde.

Bei Verwendung handelsüblicher PMF werden deshalb erfindungsgemäß mehrere Torsionssektionen mit abwechselnder Torsionsrichtung zur Erzeugung der gewünschten Transformation kaskadiert. Alternativ dazu ist eine schwächer als handelsübliche PMF, jedoch viel stärker als normaler LWL doppelbrechende, spezielle PMF vorzuziehen.

Die Torsion kann in all diesen Fällen variabel ausgebildet werden, beispielsweise durch Verwendung von Schrittmotoren.

Der wegen der begrenzten mechanischen Festigkeit von Lichtwellenleitern naturgemäß begrenzte Torsionsbereich kann zu einer Behinderung der Kompensationsfähigkeit führen, insbesondere bei Betrieb als PMD-Kompensator. Durch herstellungsbedingt nichtideale festgelegte Längen der Torsionsstücke und ähnliche Einflüsse können außerdem Funktionsungenauigkeiten entstehen. Diese eventuellen Nachteile lassen sich durch Einfügen zusätzlicher Torsionssektionen beheben. Dabei kann es günstig sein, mehrere unabhängig voneinander tordierbare Torsionssektionen oder Gruppen von Torsionssektionen nahe beieinander anzuordnen. Wünschenswert sind sogenannte endlose Polarisationsregelungen. Grund dafür ist, daß insbesondere bei Betrieb als PMD-Kompensator ein unterbrechungsfreies Kompensieren erforderlich ist; jede, auch kurze Unterbrechung könnte wegen der üblichen extrem hohen Übertragungsbitraten zu unerwünsch-

ten Bitfehlern im Empfänger führen. Einen guten Überblick über endlose Polarisationsregelungen geben das IEEE Journal of Lightwave Technology in Band 9, Oktober 1991, No. 10, S. 1353–1366 und insbesondere die dort zitierten Literaturstellen. Endlose Polarisationsregelungen, welche auf tordierter polarisationserhaltender Lichtleitfaser beruhen, sind allerdings noch nicht bekannt.

Statt linear doppelbrechender PMF kann auch zirkular oder elliptisch doppelbrechende PMF eingesetzt werden; dabei sind jedoch die Polarisationstransformatoren zu modifizieren.

Es folgt eine genauere Beschreibung erfindungsgemäßer PMD-Emulatoren und PMD-Kompensatoren anhand der Fig. 1 bis 5.

Fig. 1 zeigt einen erfindungsgemäßen PMD-Emulator oder -Kompensator im Schema.

Fig. 2 zeigt einen phasenangepaßten Modenwandler als Polarisationstransformator.

Fig. 3 zeigt einen endlosen Polarisationstransformator mit tordierten Stücken linear doppelbrechenden Lichtwellenleiters.

Fig. 4 zeigt einen beweglichen Ankerpunkt linear doppelbrechenden Lichtwellenleiters in der durchbohrten Achse eines Schrittmotors.

Fig. 5 zeigt zwei Einzelemulatoren oder -kompensatoren, welche zirkular doppelbrechenden Lichtwellenleiter und bewegliche Lichtwellenleiterschlaufen enthalten.

Im Ausführungsbeispiel der Fig. 1 durchläuft eine Lichtwelle L einen PMD-Emulator oder -Kompensator EK innerhalb eines Lichtwellenleiters LWL von einem Eingang EE zu einem Ausgang AA. Der Lichtwellenleiter LWL besteht aus polarisationserhaltendem Lichtwellenleiter PMF, welcher nicht unterbrochen wird und auch bei der Herstellung nicht zerschnitten oder, außer an Eingang EE und Ausgang AA, gespleißt werden muß. Aus diesem Grund besitzt der PMD-Emulator oder -Kompensator EK eine sehr geringe Einfügedämpfung für die Lichtwelle L. Der PMD-Emulator oder -Kompensator EK enthält eine Kette von Einfachemulatoren oder -kompensatoren 1, 2, . . . N. Jeder dieser Einfachemulatoren oder -kompensatoren 1, 2, . . . N besitzt seinerseits einen Eingang E und einen Ausgang A, wobei der Ausgang A eines Einfachemulators oder -kompensators jeweils mit dem Eingang E des darauffolgenden verbunden ist. In jedem dieser Einfachemulatoren oder -kompensatoren 1, 2, . . . N folgt auf den Eingang E ein Polarisationstransformator PT, ein polarisationsdispersiver Lichtwellenleiter PMF mit einer differentiellen Gruppenlaufzeit DGD und der Ausgang A.

Eingang EE und Ausgang AA der Anordnung können auch vertauscht werden, so daß die Lichtwelle L die Anordnung nicht vom Eingang EE zum Ausgang AA durchläuft, sondern in umgekehrter Richtung. Auch die Reihenfolge von Polarisationstransformator PT und differentieller Gruppenlaufzeit DGD aufweisendem Lichtwellenleiter kann gegenüber der beschriebenen Reihenfolge in einem, mehreren oder allen Einzelemulatoren oder -kompensatoren 1, 2, . . . N vertauscht werden.

Der polarisationsdispersive Lichtwellenleiter mit der Gruppenlaufzeit DGD ist ein mit geeigneter Länge gewähltes Stück des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF.

Handelsübliche PMF besitzt Schwebungswellenlängen, innerhalb derer eine Phasenverzögerung von 360° oder eine Periodendauer Zeitverzögerung der Lichtwelle zwischen den beiden Hauptpolarisationen entsteht, in der Größenordnung von 2 bis 4 mm bei einer Wellenlänge von 1550 nm der Lichtwelle L. Dies entspricht einer differentiellen Verzögerungszeit DGD des polarisationsdispersiven Lichtwellenleiters von 2,6 bis 1,3 ps pro Meter Länge. Differentielle Verzögerungszeit eines homogenen doppelbrechenden Lichtwellenleiters fester Länge und Schwebungswellenlänge der Doppelbrechung skalieren invers zueinander.

Auch im Polarisationstransformator PT wird das Licht im polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF geführt, was, wie unten beschrieben, durch erfindungsgemäße Ausgestaltung des Polarisationstransformators PT möglich ist.

Die Gesamtzahl von Einfachemulatoren oder -kompensatoren kann in weiten Grenzen variieren, zwischen 1 und großen, gerade noch wirtschaftlich vertretbaren Zahlen wie 100 oder 200. Günstig ist es, die Gesamtzahl zwar gering, aber dennoch mindestens so groß zu wählen, daß sich ähnliche statistische Eigenschaften der Polarisationsdispersion wie beim zu emulierenden oder kompensierenden Lichtwellenleiter ergeben. Dafür sind, je nach Erfordernissen, etwa 6 bis 50 Einfachemulatoren oder -kompensatoren erforderlich.

Erfindungsgemäß sind viele Einfachemulatoren oder -kompensatoren insbesondere dann zweckmäßig einzusetzen, wenn PMD-Emulation bzw. -kompensation für sehr breitbandige Signale, d. h. z. B. für Datensignale mit hoher Übertragungsrate, oder für mehrere oder viele Signale im optischen Wellenlängenmultiplexbetrieb angestrebt wird.

Wenn die Erfindung lediglich als PMD-Emulator eingesetzt wird, ist es zur Minimierung des Aufwands zweckmäßig, als Polarisationstransformator PT lediglich einen Modenkonverter zu verwenden. Weitere Polarisationstransformationen entstehen nämlich ohnehin durch Temperaturdrift des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF. Im Emulator sind diese, anders als in einem guten Kompensator, tolerierbar.

Ein Modenkonverter für linear doppelbrechenden polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF kann erfindungsgemäß als phasenangepaßter Modenkonverter wie in Fig. 2 dargestellt ausgeführt werden. Er enthält polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF, an dem zwei ineinandergreifende Torsionsanker FK, BK, die hier die Form von Kämmen besitzen, befestigt sind, beispielsweise mittels Epoxikleber. Diese können gegeneinander um den polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF als Achse verdreht werden, wobei außenliegende Kammteile sich in der Drehrichtung DR drehen können. Es können beide Torsionsanker beweglich ausgeführt werden, oder einer davon ist ein fester Torsionsanker FK, der andere ein beweglicher Torsionsanker BK. Als Antrieb von Torsionsankern BK eignen sich beispielsweise Schrittmotoren SM, die zur Erzielung hoher Auflösung im wegkontinuierlichen Mikroschrittbetrieb betrieben werden können. Durch Verdrehung der Torsionsanker oder Kämmen FK, BK gegeneinander kommt es auch zur Torsion der kurzen Lichtwellenleiterstücke TS zwischen den Kammzinken ZI. Die Torsion in den Torsionsstücken TS ist eine mechanische Beanspruchung MB. Zur Erhöhung der Übersicht sind in Fig. 2 nur wenige der insgesamt vorhandenen Lichtwellenleiterstücke TS, Kammzinken ZI und mechanischen Beanspruchungen MB mit Bezeichnungen versehen.

Wenn beispielsweise der feste Torsionsanker oder Kamm FK nur zwei, der bewegliche Torsionsanker oder Kamm BK nur eine Zinke besitzt, so daß er zu einem Drehhebel entartet, so ergibt sich ein aus Applied Optics, Band 18, No. 13, S. 2241–2251 (siehe dort Fig. 9) bereits bekannter Modenwandler. Die Verwendung von mehr Kammzinken ZI hat aller-

dingen den Vorteil, daß geringere Drehwinkel der zwei Kämme BK, FK gegeneinander erforderlich sind. Insbesondere ist die Doppelbrechung von handelsüblicher PMF so stark, daß eine Torsion um die in der Literaturstelle angegebenen 68° die PMF zumindest langfristig zerstören würde. Die Länge, innerhalb derer die 68° Torsion erfolgen müssen, beträgt im Fall von 2 mm Schwebungswellenlänge nämlich nur 0,7 mm. Je mehr Torsionssektionen vorhanden sind, desto geringer dürfen die Torsionswinkel sein und desto mehr nähern sich die Längen der Torsionsstücke TS einer halben Schwebungswellenlänge der Lichtwelle L im polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF an.

Wenn die Erfindung als besonders vielfältig variierbarer PMD-Emulator oder als PMD-Kompensator eingesetzt werden soll, ist es, wie schon erwähnt, zweckmäßig, viele Einfachemulatoren bzw. -kompensatoren einzusetzen, oder man setzt variabelere Polarisationstransformatoren PT ein. Der letztere Fall ist beispielhaft in Fig. 3 illustriert. Der feste Torsionsanker FK besitzt hier nur zwei Zinken. Dagegen sind mehrere bewegliche Torsionsanker BK1, BK2, BK3 vorgesehen.

Als Anzahl der beweglichen Torsionsanker eignet sich insbesondere die Zahl drei, weil dadurch erfindungsgemäß eine endlose Polarisationstransformation möglich ist. Alternativ dazu kommen zwei, um eine technisch einfachere Ausführungsform zu erhalten, oder vier und mehr bewegliche Torsionsanker in Frage, um die Realisierung und Ansteuerung der Polarisationstransformatoren zu erleichtern. Besonders dann, wenn die Schwebungswellenlänge des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF nicht exakt bestimmt werden kann oder ortsabhängig schwankt, ist es zweckmäßig, mehr als drei bewegliche Torsionsanker einzusetzen. Auch die festen Torsionsanker FK können einer oder beide durch bewegliche Torsionsanker BK0, BK4 ersetzt werden. Dies bietet erfindungsgemäß zusätzliche Variabilität der Polarisationstransformation, so daß auch Abweichungen der Längen der Torsionssektionen TS1, TS2, TS3, TS4 vom gewünschten Wert, Inhomogenitäten der Doppelbrechung des Lichtwellenleiters PMF und ähnliche Ungenauigkeiten die Fähigkeit zur endlosen Polarisationsregelung nicht beeinträchtigen können.

Zunächst seien die Ankerpunkte vernachlässigbar kurz, so daß der Polarisationstransformator PT quasi nur aus tordierbaren Lichtwellenleitern besteht. Die Längen der 4 Torsionssektionen TS1, TS2, TS3, TS4 des Lichtwellenleiters PMF werden in diesem Fall etwa so groß gewählt, daß die im torsionsfreien Betrieb auftretende Phasenverzögerung zwischen dem schnellen und dem langsamen Schwingungsmodus des Lichtwellenleiters PMF etwa gleich 1,7 rad ist. Dies entspricht einem $1,7/(2 \cdot \pi) = 0,27$ fachen einer Schwebungswellenlänge. Um Inhomogenitäten der Doppelbrechung des Lichtwellenleiters PMF und ähnliche Ungenauigkeiten die Fähigkeit zur endlosen Polarisationsregelung nicht beeinträchtigen zu lassen, können diese Längen auch variiert werden; beispielsweise können die Torsionssektionen TS1, TS4 jeweils so lang gewählt werden, daß sie Phasenverzögerungen von etwa 1,6 rad aufweisen, und Torsionssektionen TS2, TS3 können jeweils so lang gewählt werden, daß sie Phasenverzögerungen von etwa 1,8 rad aufweisen.

Um erfindungsgemäß endlose Polarisationstransformationen zu ermöglichen, sollen unter idealisierten Voraussetzungen Torsionsanker BK2 um mindestens etwa $\pm 73^\circ$, und Torsionsanker BK1, BK3 jeweils um mindestens etwa $\pm 35^\circ$ gegenüber der torsionsfreien Lage drehbar sein. Da sich bei der Torsion des Lichtwellenleiters PMF nicht nur die Hauptachsen geometrisch drehen, sondern sich auch die Polarisationsellipse der optischen Welle in geringem Maße, um etwa 5 bis 10% der geometrischen Drehung, mitdreht, ist der Torsionsbereich der Torsionsanker in der Praxis mit einem Faktor F von etwa 1,05 bis 1,1 zu multiplizieren, so daß man auf etwa $\pm 79^\circ$ für Torsionsanker BK2, und auf etwa $\pm 38^\circ$ für Torsionsanker BK1, BK3 kommt. Diese Werte können je nach Lichtwellenleitertyp um etwa $\pm 10\%$ schwanken.

Weitere Variationen sowohl der Längen der Torsionssektionen TS1, TS2, TS3, TS4, als auch der Drehbarkeit der Torsionsanker BK1, BK2, BK3, können dadurch erforderlich werden, daß die Befestigungen an den Ankerpunkten FK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4 nicht punktförmig erfolgen, sondern über eine gewisse Länge, so daß aufeinanderfolgende Torsionssektionen durch ein kleines Stück nichttordierbaren, aber doppelbrechenden weil polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters getrennt sind.

Endlose Polarisationstransformation ist stets dann möglich, wenn bestimmte gemeinsame periodische Drehwinkeländerungen der beweglichen Torsionsanker BK1, BK2, BK3 so angegeben werden können, daß eine Hauptpolarisation des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF in jeder Phase dieser Drehwinkeländerungen wenigstens näherungsweise in die andere, zur ersten orthogonale Hauptpolarisation transformiert wird. Mit geringeren als den so spezifizierten Drehwinkeln lassen sich dann alle anderen möglichen und erforderlichen Polarisationstransformationen erreichen.

Mit Rechnerunterstützung läßt sich dies auch bei Berücksichtigung der endlichen Befestigungsbreiten an den Ankerpunkten leicht berechnen, so daß die erforderlichen Längen der Torsionssektionen sowie die Drehwinkelbereiche für viele Ausführungsbeispiele der Erfindung problemlos angegeben werden können. Je nach Befestigungsbreiten können so deutliche Variationen der oben als erforderlich genannten Längen und Drehwinkelbereiche erreicht werden. Die folgende, keineswegs vollständige Tabelle führt einige Ausführungsbeispiele an. Die Werte wurden nicht mit der großen Genauigkeit errechnet, welche die Tabelle suggeriert, und in der Praxis verursachen Inhomogenitäten des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters und andere Störeinflüsse ohnehin zu größeren Ungenauigkeiten, welche durch individuelle Drehwinkelsteuerung der Torsionsanker und ggf. mehr Torsionsanker behoben werden können. Die Auswahl an Längen der Torsionssektionen TS1, TS2, TS3, TS4 und Lichtwellenleiterbefestigungsbreiten der Torsionsanker BK1, BK2, BK3 ermöglicht es, mit polarisationserhaltendem Lichtwellenleiter PMF gegebener Schwebungswellenlänge und gegebenen mechanischen Konstruktionsvorgaben ein kompaktes und leistungsfähiges Ausführungsbeispiel konstruieren zu können.

In der Tabelle bedeuten die Spalten

- TS1, TS4 die differentiellen Verzögerungen in Radiant der Torsionssektionen TS1, TS4,
- TS2, TS3 die differentiellen Verzögerungen in Radiant der Torsionssektionen TS2, TS3,
- CA, CB, CC zirkulare Doppelbrechungsanteile der Torsionssektionen in Radiant, die, wie anschließend erläutert, in direkter Beziehung zu erforderlichen Drehwinkeln der Ankerpunkte BK1, BK2, BK3 stehen,
- VV die differentiellen Verzögerungen in Radiant der an den Torsionsankern BK1, BK2, BK3 befestigten Anteile des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters.

CA, CB, CC spezifizieren die angegebenen periodischen Drehwinkeländerungen der beweglichen Torsionsanker BK1, BK2, BK3, welche eine Hauptpolarisation des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF in jeder Phase dieser Drehwinkeländerungen wenigstens näherungsweise in die andere, zur ersten orthogonale Hauptpolarisation überführen. Die tatsächlichen Drehwinkel in Radiant ergeben sich wie folgt:

für Torsionsanker BK1: $F \cdot (CA/2 \cdot \cos(\phi) + CC/2 \cdot \sin(\phi))$

für Torsionsanker BK2: $F \cdot CB/2 \cdot \cos(\phi)$

für Torsionsanker BK3: $F \cdot (CA/2 \cdot \cos(\phi) - CC/2 \cdot \sin(\phi))$.

Dabei ist ϕ ein Winkel, der sich kontinuierlich ändert, und F der obengenannte Faktor. Bei punktförmiger Befestigung an den Torsionsankern, also $VV = 0$, und einem angenommenen Wert $F = 1,08$ ergeben sich beispielsweise für die Drehwinkel von Torsionsanker BK2 die bereits oben angeführten Extremwerte $\pm 1,08 \cdot 2,55 \text{ rad/2} = \pm 79^\circ$.

TS1, TS4	TS2, TS3	CA	CB	CC	VV	
1,6822	1,7063	0,3838	2,5547	1,2078	0	
1,2671	1,5748	0,3495	2,3959	1,1854	0,2618	15
1,4455	1,1221	0,5732	2,6100	1,0970	0,5236	
1,2025	0,8886	0,6022	2,5738	1,0694	0,7854	
1,3073	0,4848	0,8161	2,8904	1,0063	1,0472	20
1,0198	0,2692	0,8146	2,8355	0,9983	1,3090	
0,8165	0,0201	0,8617	2,8883	0,9779	1,5708	
0,8589	-0,3367	1,0935	3,3401	0,9318	1,8326	25
2,7641	1,4520	0,7614	2,7293	1,8135	2,0944	
2,5026	1,3362	0,7189	2,6072	1,6315	2,3562	
1,8341	1,4392	0,8738	2,8254	1,2814	2,6180	30
0,9181	1,5792	1,1139	3,3008	1,0629	2,8798	
1,1501	1,1127	0,8317	2,7393	1,1223	3,1416	
1,1970	0,7358	0,6622	2,4338	1,1670	3,4034	35
0,9436	0,5144	0,6253	2,3754	1,1342	3,6652	
1,3571	-0,0743	0,3394	1,9702	1,3624	3,9270	
1,3911	-0,4864	0,1727	1,7839	1,5200	4,1888	40
2,6186	3,1806	-1,0906	2,9154	1,7668	4,7124	
2,2898	3,1127	-0,7477	2,8373	1,6412	4,9742	
1,9981	2,9663	-0,4681	2,7409	1,5389	5,2360	45
1,4313	2,9682	-0,4526	2,5668	1,4914	5,4978	
1,2133	2,7217	-0,2611	2,4324	1,4389	5,7596	
1,8867	1,9482	0,3109	2,6135	1,2669	6,0214	50
1,6822	1,7063	0,3838	2,5547	1,2078	6,2832	

Weitere Ausführungsbeispiele ergeben sich durch längere Torsionssektionen TS1, TS2, TS3, TS4, welche um eine ganze Anzahl von Schwebungswellenlängen der Lichtwelle länger sind als angegeben. Die Torsionswinkel sind dabei dergestalt zu ändern, daß sich eine unveränderte Torsionsrate, d. h. Winkeländerung pro Längeneinheit ergibt. Auf diese Weise lassen sich auch die angegebenen Beispiele mit negativen Längen in realisierbare Ausführungsbeispiele umsetzen. Analoges gilt für die Spalte VV. Dies läßt sich durch Vergleich der ersten und der letzten Tabellenzeile leicht ersehen; diese Zeilen unterscheiden sich nämlich lediglich um den Wert $2 \cdot \pi$ Radiant in der Spalte VV.

Die in der Tabelle angegebenen Winkel CA, CB, CC sind auch lediglich als Anhaltswerte zu verstehen, denn zum Erzielen größerer Variabilität von Polarisations Transformationen kann es zweckmäßig sein, deutlich größere, beispielsweise um einen Faktor 1,5 oder gar 2 vergrößerte Drehwinkel CA, CB, CC vorzusehen.

Ausführungsbeispiele mit mehr als drei beweglichen Torsionsankern können beispielsweise so ausgebildet sein, daß sich damit wenigstens näherungsweise dieselben Torsionsprofile als Funktion des Ortes im polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter PMF erreichen lassen wie in den angegebenen Beispielen.

Um die genannte Länge, beispielsweise das 0,27fache einer Schwebungswellenlänge, ohne Zerstörung des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters um einen Drehwinkelbereich der genannten Größenordnung, beispielsweise $\pm 79^\circ$ oder auch mehr, um nämlich weitere Regelmöglichkeiten zur Verfügung zu haben, tordieren zu können, muß die Schwe-

bungswellenlänge ausreichend groß gewählt werden. In Frage kommen insbesondere Schwebungswellenlängen von 10 bis 200 mm, bevorzugt solche im Bereich zwischen 30 und 100 mm. Bei angenommenen 50 mm Schwebungswellenlänge bei 1550 nm Wellenlänge der Lichtwelle L beträgt die differentielle Verzögerungszeit etwa 0,1 ps pro Meter. Um eine differentielle Gruppenlaufzeit DGD von beispielsweise 25 ps zu erhalten, benötigt man daher etwa 250 Meter polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters PMF. Bei beispielsweise 10 Einzelemulatoren oder -kompensatoren mit dieser differentiellen Gruppenlaufzeit DGD werden dann insgesamt etwa 2,5 km Lichtwellenleiter benötigt.

Polarisationserhaltende Lichtwellenleiter mit linearer Doppelbrechung der genannten Größenordnung lassen sich nach dem Stand der Technik leicht durch elliptischen Kernquerschnitt oder durch gezielten Einbau mechanischer Spannungen herstellen. Nachteilig, aber in Kauf zu nehmen sind bei größerer Schwebungswellenlänge die größere zum Erzielen einer bestimmten differentiellen Gruppenlaufzeit DGD erforderliche Länge und der geringere Grad der Polarisationserhaltung. Erstere verursacht wegen der sehr geringen Dämpfung von Quarzglas-Lichtwellenleitern keine besonders hohen Dämpfungsverluste, und letzterer kann beim Entwurf und bei der Inbetriebnahme der Polarisationstransformatoren PT durch mehr Ankerpunkte FK, BK oder durch Festlegung von Abweichungen der Drehwinkelbereiche von den oben angegebenen Werten berücksichtigt werden, siehe obige Tabelle.

Bei elliptischem Kernquerschnitt des Lichtwellenleiters kann die Dämpfung einer Länge von 2,5 km sehr gering sein, bis herunter zu etwa 0,5 dB insgesamt. Außerdem kann der polarisationserhaltende Lichtwellenleiter PMF gleichzeitig zur Kompensation oder Emulation chromatischer Lichtwellenleiterdispersion ausgelegt sein.

Um eine versehentliche Zerstörung der Torsionssektionen TS, TS1, TS2, TS3, TS4 zu vermeiden und bei Bedarf, z. B. nach einem Stromausfall der Schrittmotorsteuerungen, den Drehwinkel eines Schrittmotors bestimmen zu können, können Drehsperrn (Anschläge) oder Winkelgeber an den Achsen von Schrittmotoren SM vorgesehen sein.

Fig. 4 zeigt einen Schrittmotor SM mit einem schematisch gezeichneten Stator ST und einer Achse AX, welche mit einer Bohrung BO durchbohrt ist. Konzentrisch in Achsendurchmesser und Stator wird der Lichtwellenleiter LWL geführt, der in diesem Ausführungsbeispiel ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter PMF ist. Der Lichtwellenleiter LWL, PMF ist an die Achse AX fest angeklebt, so daß die Achse AX gleichzeitig einen beweglichen Torsionsanker BK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4 darstellt. Insbesondere bei Verwendung eines Schrittmotors in scheibenförmiger (flacher) Sonderbauform ist diese Anordnung äußerst kompakt, so daß sich der gesamte Polarisationstransformator PT der Fig. 3 ebenfalls kompakt aufbauen läßt. Insbesondere können die Abstände zwischen den beweglichen Ankerpunkten BK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4 so gering sein, daß man doppelbrechenden Lichtwellenleiter PMF mit Schwebungswellenlänge maßvoller Größe einsetzen kann.

Während bisher von linear doppelbrechendem Lichtwellenleiter PMF und Torsion als mechanischer Beanspruchung MB in Polarisationstransformator PT die Rede war, wird in einem anderen Ausführungsbeispiel tordierter Standard-Lichtwellenleiter LWL als zirkular doppelbrechender Lichtwellenleiter PMF eingesetzt. Wie in Electron. Lett., 17 (1981) 11, auf Seiten 388-389 ausgeführt ist, erhält ein normaler einmodiger Lichtwellenleiter durch Torsion eine zirkuläre Doppelbrechung. Vorteilhaft gegenüber den vorgenannten Ausführungsbeispielen ist, daß normaler Lichtwellenleiter leicht verfügbar ist. Fig. 5 zeigt beispielhaft zwei Einzelemulatoren oder -kompensatoren 1, 2, welche zirkular doppelbrechenden Lichtwellenleiter und bewegliche Lichtwellenleiterschlaufen oder Faserschlaufen FS1, FS2 enthalten. Der Lichtwellenleiter LWL ist jeweils vor und hinter den Polarisationstransformatoren PT an Haltepunkten H eingespannt. Zwischen zwei benachbarten Haltepunkten H, die einen Polarisationstransformator PT einschließen, wirkt er als normaler, ohne zusätzliche Biegung näherungsweise nicht doppelbrechender Lichtwellenleiter LWL. Zumindest in bestimmten Stellungen der drehbaren Faserschlaufen ist er untordiert, bei frei in den Lichtwellenleiterschlaufen FS1, FS2 beweglichem Lichtwellenleiter LWL sogar in jeder Stellung dieser Lichtwellenleiterschlaufen FS1, FS2. Zwischen zwei benachbarten Haltepunkten, zwischen denen kein Polarisationstransformator PT liegt, ist der Lichtwellenleiter dagegen stark tordiert, so daß er als zirkular doppelbrechender und zirkular polarisationserhaltender Lichtwellenleiter PMF mit einer differentiellen Gruppenlaufzeit DGD zwischen den beiden zirkularen Hauptpolarisationen wirkt. Zur Herstellung eignet sich z. B. eine Verseilungsmaschine. Die Polarisationstransformatoren PT enthalten Faserschlaufen FS1, FS2. Diese sind z. B. aus Electronics Letters, Band 21, 1985, Seiten 895-896 und Electronics Letters, Band 22, 1986, Seiten 78-79 in endlos drehbarer Form bekannt, können aber insbesondere dann, wenn die Einrichtung lediglich als Emulator, nicht aber als Kompensator von PMD eingesetzt werden soll, auch begrenzt drehbar sein, was die Konstruktion erleichtert. Mit zwei Viertelwellenschlaufen, also Faserschlaufen, in welchen zwischen den bei Biegung entstehenden linearen und zueinander orthogonalen Hauptpolarisationen Phasenverzögerungen von $\pi/2$ Radiant auftreten, läßt sich erfindungsgemäß endlose Polarisationstransformation für den hier erforderlichen Anwendungsfall erzielen. Durch mehr als zwei Faserschlaufen in einem Polarisationstransformator PT können herstellungsbedingte Nichtidealitäten des Lichtwellenleiters, z. B. unerwünschte Torsion, ausgeglichen werden. Die Faserschlaufen FS1, FS2 sind drehbar ausgelegt, und außerdem ist der Lichtwellenleiter LWL dort prinzipbedingt gebogen, so daß sich wie im ersten Ausführungsbeispiel eine mechanische Beanspruchung MB des Lichtwellenleiters LWL ergibt.

Der erfindungsgemäße PMD-Kompensator EK kann so wie in Electron. Lett., 17. Feb. 1994, Band 30, No. 4, S. 348-349 beschrieben in einem optischen Empfänger zur PMD-Kompensation eingesetzt werden.

Patentansprüche

1. Emulator oder Kompensator (EK) von Polarisationsmodendispersion einer Lichtwelle (L) mit einem Eingang (EE), einem Lichtwellenleiter (LWL), von dem zumindest ein Teil ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter (PMF) mit einer differentiellen Gruppenlaufzeit (DGD) ist, einem Polarisationstransformator (PT) und einem Ausgang (AA), **dadurch gekennzeichnet**, daß in einem Polarisationstransformator (PT) ein Lichtwellenleiter (LWL, PMF), welcher in einen eine differentielle Gruppenlaufzeit (DGD) aufweisenden polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter (PMF) stoßfrei und spleißlos übergeht, einer mechanischen Beanspruchung (MB) ausgesetzt werden kann.
2. Anordnung nach Anspruch 1, in der dieser Lichtwellenleiter (LWL) einen polarisationserhaltenden Lichtwellen-

leiter (PMF) mit linearer Doppelbrechung aufweist.

3. Anordnung nach Anspruch 2, in der in einem Polarisationstransformator (PT) ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter (PMF) an gegeneinander in einer Drehrichtung (DR) beweglichen Ankerpunkten (FK, BK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4) befestigt ist, so daß zwischen diesen Ankerpunkten (FK, BK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4) verlaufende Torsionssektionen (TS, TS1, TS2, TS3, TS4) einer Torsion als mechanischer Beanspruchung (MB) ausgesetzt werden.

4. Anordnung nach Anspruch 3, in der mindestens ein Ankerpunkt (FK, BK) mehrere Kammzinken (ZI) aufweist, wobei zu verschiedenen gegeneinander beweglichen Ankerpunkten (FK, BK) gehörende Kammzinken (ZI) periodisch abwechselnd aufeinander folgen, so daß dazwischen verlaufende Torsionssektionen (TS) in periodisch wechselndem Drehsinn tordiert werden können.

5. Anordnung nach Anspruch 3 oder 4, in der zwischen zwei Ankerpunkten (FK, BK0, BK4) mehrere Ankerpunkte (BK1, BK2, BK3) vorgesehen sind, die durch aufeinanderfolgende Torsionssektionen (TS1, TS2, TS3, TS4) voneinander getrennt sind.

6. Anordnung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, in der die Drehung eines Ankerpunkts (BK, BK0, BK1, BK2, BK3, BK4) in Drehrichtungen (DR) durch einen Schrittmotor (SM) bewirkt werden kann.

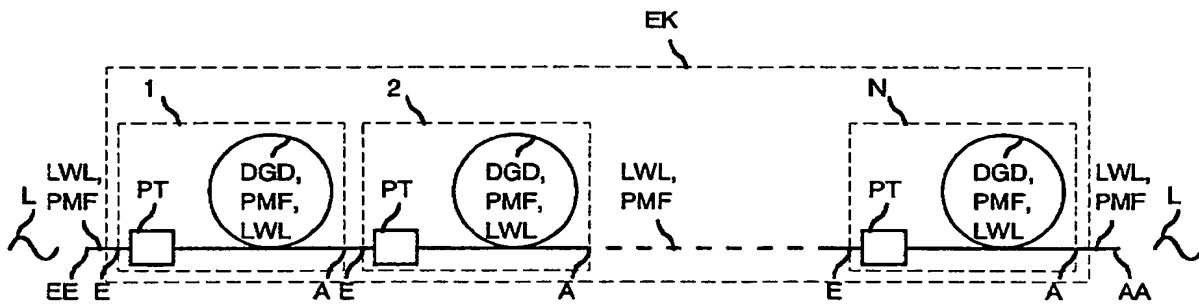
7. Anordnung nach Anspruch 1, in der dieser Lichtwellenleiter (LWL) zwischen keinen Polarisationstransformator (PT) einschließenden benachbarten Haltepunkten (H) tordiert ist, so daß er als polarisationserhaltender Lichtwellenleiter (PMF) mit zirkularer Doppelbrechung wirkt, zwischen einen Polarisationstransformator (PT), welcher mindestens eine bewegliche und bei Bewegung eine mechanische Beanspruchung (MB) dieses Lichtwellenleiters (LWL) verursachende Faserschlaufe (FS1, FS2) aufweist, einschließenden benachbarten Haltepunkten (H) jedoch zumindest in einer bestimmten Stellung dieser Faserschlaufen (FS1, FS2) nicht tordiert ist, so daß diese Faserschlaufen (FS1, FS2) wie drehbare Wellenplatten wirken.

8. Anordnung nach Anspruch 7, in der mindestens eine dieser Faserschlaufen (FS1, FS2) wenigstens näherungsweise als drehbare Viertelwellenplatte wirkt.

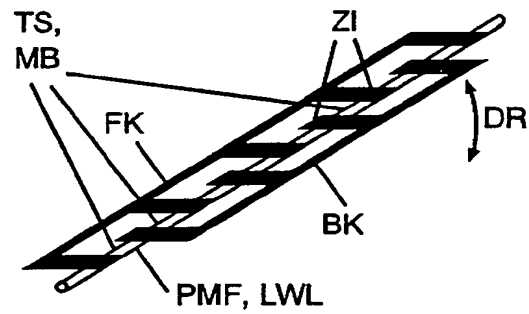
9. Anordnung nach einem der vorstehenden Ansprüche, in der mehrere Einzelemulatoren oder -kompensatoren (1, 2, N) mit je einem Eingang (E) und einem Ausgang (A) vorgesehen sind, wobei ein Ausgang (A) eines Einzelemulators oder -kompensators (1, 2, N) mit einem Eingang (E) des darauffolgenden verbunden sein kann.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

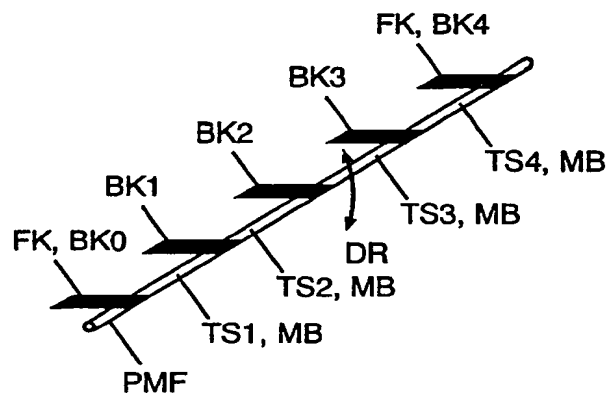
- Leerseite -



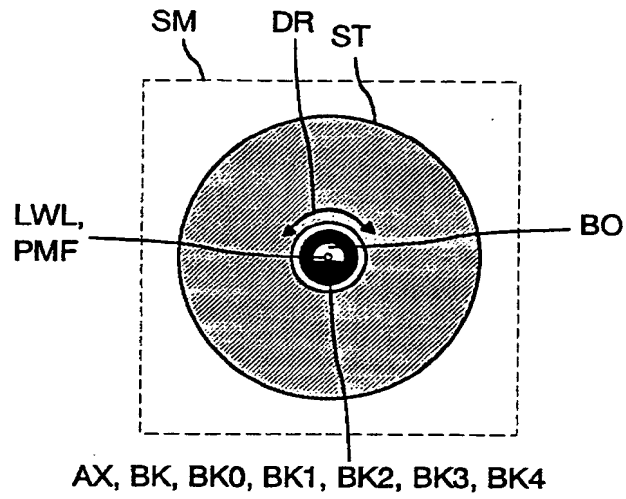
Figur 1



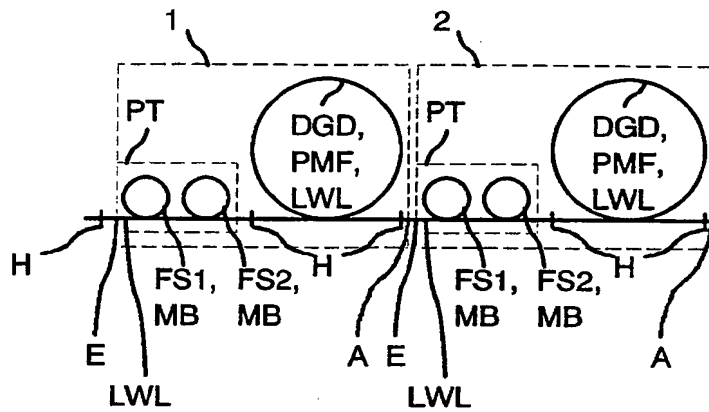
Figur 2



Figur 3



Figur 4



Figur 5